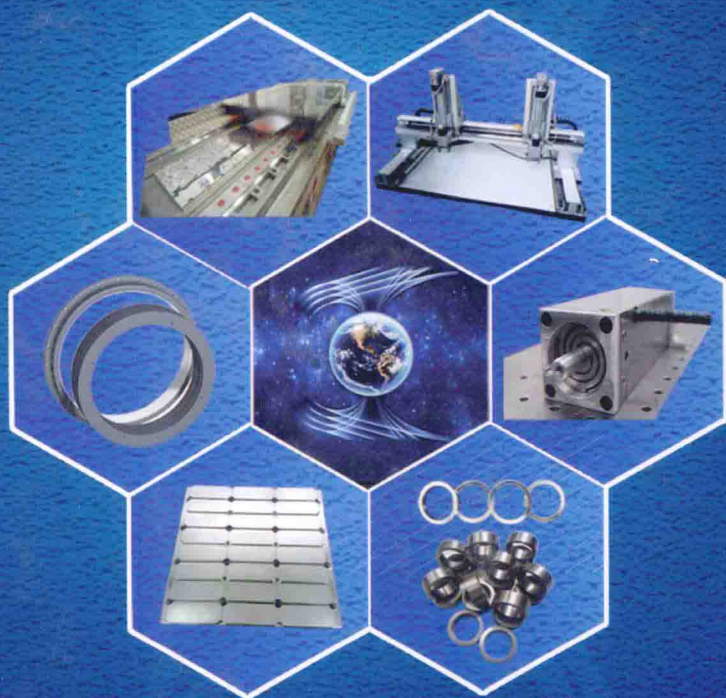


新型稀土永磁材料与 永磁电机

闫阿儒 张 驰 编著



科学出版社

中国科学院宁波工业技术研究院（筹）科技协同创新丛书

新型稀土永磁材料与永磁电机

闫阿儒 张 驰 编著
陈仁杰 廖有用 参编
李 东 陈进华

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书为稀土永磁材料及其制备与永磁电机设计及应用方面的专著,包含上述领域的最新科研进展。本书内容共9章,第1~第4章详细介绍几类典型稀土永磁材料及其制备技术,重点介绍烧结稀土永磁材料、热压/热变形稀土永磁材料的制备原理和工艺技术、热挤出辐射取向环形永磁体制备与充磁技术等。第5~第9章介绍永磁电机的设计与应用技术,着重介绍永磁旋转电机(伺服电机、力矩电机和轮毂电机)、永磁直线电机(有铁心、无铁心、圆筒形和音圈电机)和辐向环永磁电机的原理、结构、特性和设计方法等,最后介绍永磁直驱电机在自动化智能化装备的几个典型应用。本书强调磁性材料与电机跨学科的结合,内容贯穿材料、设计、制造和应用诸多方面。

本书适合从事永磁材料研究、生产与应用的科技人员以及电气工程及其自动化、自动化、机械电子工程等技术领域的科技人员阅读、参考,也可作为大专院校相关专业师生的自学和教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

新型稀土永磁材料与永磁电机 / 闫阿儒, 张驰编著. —北京: 科学出版社, 2014

中国科学院金属研究所(筹)科技协同创新丛书

ISBN 978-7-03-042104-3

I. ①新… II. ①闫… ②张… III. ①稀土永磁材料 ②稀土永磁电机 IV. ①TM273 ②TM351

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第228048号

责任编辑: 余 丁 王 苏 / 责任校对: 陈玉凤

责任印制: 肖 兴 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2014年10月第一次印刷 印张: 27 1/2

字数: 534 000

定价: 160.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

中国科学院宁波工业技术研究院（筹）

科技协同创新丛书

主 编：崔 平

执行主编：何天白

本书主编：闫阿儒 张 驰

本书编委：陈仁杰 廖有用 李 东 陈进华

本书参编：张 杰 黄彬彬 陆 彤 赵 飞

乔 海 闵孟斌 许晶波 李 荣

郭 帅 刘 壮 尹文宗 刘 剑

陈 岭 刘 雷 严长江 唐 旭

靳朝相

序 言

在当今信息时代，磁性材料扮演着十分重要的角色，特别是其中的“永磁之王”——稀土永磁材料更是不可或缺。作为一种重要的功能材料，稀土永磁材料支撑着现代电子信息社会，被广泛应用于能源、交通、机械、医疗、计算机和家电等领域，深入国民经济的方方面面。

进入 21 世纪以来，我国的稀土永磁材料产业取得了巨大的成就，成为我国最具有资源特色的战略性新兴产业之一。我国已成为全球最大的稀土永磁材料生产基地，其年产量超过全球产量的 80%。

稀土永磁材料的重要应用之一是永磁电机。在我国，电机系统的用电量约占全国用电量的 60%，随着我国能源紧缺问题的日益严重，开发和利用节能电机具有非常重要的战略意义和经济价值。与传统的异步电机相比，稀土永磁电机效率提高 10%~15%，成为节能电机的典范。此外，永磁同步电机（伺服电机）因为其良好的调速性能，已广泛应用于各种制造装备中，成为高档数控装备的核心部件。近年来，随着永磁材料及其配套技术的支持，永磁电机形成了快速发展的势头，并逐渐向大功率、大转矩、耐高温、智能化等方向发展。与此同时，永磁电机的发展又不断对永磁材料的性能提出更高的要求，促进了稀土永磁材料的发展，两者形成了相互促进、共同提升的良性循环。

我国的稀土永磁产量已居世界第一，但在高端应用方面却亟待提高。因此，要使我国尽早实现从生产大国到应用大国的跨越，大力推进稀土永磁材料应用尤其是稀土永磁电机的研发工作意义重大。形成稀土永磁材料—永磁电机—应用的产业链，这不仅是稀土产业本身发展的需要，同时也是经济发展的需求。


随着我国稀土永磁产业的迅速发展，为满足生产和应用中的实际需求而开展的研究开发是稀土永磁材料研究的一大特色。中国科学院宁波材料技术与工程研究所坚持“料要成材，材要成器，器要好用”的理念，将材料科学、材料制造技术和材料应用技术结合起来，在稀土永磁材料制备与应用技术方面的研究布局兼顾产业链的上下游，涵盖了新型稀土永磁材料的研发、产业化技术推广，以及先进稀土永磁器件等，这种跨领域大团队协同创新的模式是有一种有益的尝试。

《新型稀土永磁材料与永磁电机》是他们打通材料—设计—制造—应用这一上下游产业链辛勤工作的结晶。该书将磁性材料技术与电机技术有机结合起来，从稀土永磁材料出发，通过研究材料的设计和制备工艺，探索大规模制备高性能稀土永磁材料的方法；再通过创新的电机设计及制造技术，将稀土永磁材料应用于

各种高效节能电机和伺服电机，进而将这些电机推广到各种自动化智能化装备。因此，该书充分体现了从稀土永磁材料到永磁电机及其应用的有机结合。

该书是宁波材料所科研人员长期科研成果和技术积累的提炼与总结。它介绍了先进的烧结稀土永磁材料、热压/热变形稀土永磁材料的制备原理和工艺技术、热挤出辐射取向环形永磁体制备与充磁技术等，不仅具有较高的学术价值，还具有很好的应用参考价值。该书还介绍了永磁旋转电机、直线电机的设计与测试方法，新型热压辐射取向环永磁电机的设计方法及优势，以及永磁直驱电机在自动化智能化装备的应用等，很多都是他们长期研发过程中的实际案例，对从事永磁电机研发与应用的科研人员及企业的研发人员具有较高的参考价值。

相信此书将为我国稀土永磁材料及永磁电机的产业发展做出重要贡献。

王震西 中国工程院院士  西
中科三环高技术股份有限公司 董事长

2014年8月

前 言

进入 21 世纪以来，我国稀土永磁产业取得长足的发展，已成为全球最大的稀土永磁材料研发中心和生产基地，稀土永磁材料产业成为我国最具有资源特色的战略性新兴产业之一，在节能环保、新能源和新能源汽车三大领域已备受市场瞩目。电机是稀土永磁材料最重要的应用领域之一。目前全世界工业总能耗的一半以上用于各种电机的运转，因此，研究和发​​展高效节能稀土永磁电机对节约能源和减少排放意义重大。

撰写本书是为了加快具有自主知识产权的稀土永磁材料和永磁电机设计与制造核心技术的研究和创新，推动稀土永磁材料技术链、产业链的延伸，突出“料要成材、材要成器、器要好用”的理念，通过科技协同创新，打通材料—设计—制造—产品创新链，而这也是中国科学院宁波材料技术与工程研究所将研究领域从新材料分别往上下游拓展到先进制造、新能源和生命健康，建设成为中国科学院宁波工业技术研究院的初衷。本书将磁性材料技术与电机技术有机结合起来，从稀土永磁材料出发，通过材料的创新设计和制备工艺，制备高性能的永磁体；再通过创新的电机设计和制造技术，将永磁体应用于各种高效节能电机，进而将这些电机推广到各种自动化智能化装备。因此，本书的内容贯穿了材料、设计、制造和应用诸多方面，体现了协同创新的思想、理念和做法。

本书内容共 9 章。第 1~第 4 章介绍几类典型稀土永磁材料及其制备技术，重点介绍烧结稀土永磁材料、热压/热变形稀土永磁材料的制备原理和工艺技术、热挤出辐射取向环形永磁体制备与充磁技术等。第 5~第 9 章介绍永磁电机的设计与应用技术，着重介绍永磁旋转电机、直线电机设计与测试方法，新型热压辐射取向环永磁电机的设计方法和优势，以及永磁直驱电机在自动化智能化装备的应用。本书是编写组所在团队长期科研成果和技术积累的提炼与总结，具有较高的学术和应用参考价值。

本书第 1~第 4 章由闫阿儒负责撰写，第 5~第 9 章由张驰负责撰写。陈仁杰、廖有用、陈进华、李东参与了大量的撰写工作，张杰、黄彬彬、陆彤、赵飞、乔海、闵孟斌、许晶波、李荣、郭帅、刘壮、尹文宗、刘剑、陈岭、刘雷、严长江、

唐旭、靳朝相等也为本书作出了贡献。

本书的撰写工作得到了中国科学院宁波工业技术研究院（筹）院长崔平、院协同创新委员会主任何天白的大力支持，这里表示诚挚的感谢。

由于著者水平所限，时间仓促，书中疏漏之处在所难免，希望广大读者批评指正。

著 者

2014年9月

于中国科学院宁波工业技术研究院

目 录

序言

前言

第 1 章 稀土永磁材料及其发展趋势	1
1.1 稀土永磁材料的发展历史	1
1.1.1 永磁材料磁性特征	1
1.1.2 稀土永磁材料简介	4
1.1.3 SmCo_5	5
1.1.4 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	7
1.1.5 Nd-Fe-B	8
1.1.6 新型结构稀土永磁材料	10
1.1.7 纳米复合稀土永磁材料	11
1.2 稀土永磁材料的制备技术	12
1.2.1 烧结稀土永磁材料的制备技术	13
1.2.2 黏结稀土永磁材料的制备技术	15
1.2.3 热压-热变形稀土永磁材料的制备技术	15
1.2.4 纳米晶磁粉的制备技术	16
1.3 稀土永磁材料的发展趋势	17
1.3.1 资源节约型的稀土永磁材料	17
1.3.2 各向异性纳米复合永磁材料的制备技术	21
参考文献	23
第 2 章 烧结稀土永磁材料	29
2.1 烧结 2:17 型 Sm-Co 永磁材料	29
2.1.1 低温度系数烧结 2:17 型 Sm-Co 永磁材料	29
2.1.2 烧结 2:17 型 Sm-Co 永磁材料的关键制备技术	43
2.1.3 纳米晶 TbCu_7 型 Sm-Co 磁体	55
2.2 烧结 Nd-Fe-B 永磁材料	71
2.2.1 烧结 Nd-Fe-B 关键制备技术	72
2.2.2 低重稀土永磁材料	89

2.2.3 烧结 Nd-Fe-B 永磁材料的稀土平衡利用	104
参考文献	114
第 3 章 热压/热变形稀土永磁材料	120
3.1 热压/热变形稀土永磁材料制备技术	120
3.1.1 概述	120
3.1.2 Nd-Fe-B 磁体热变形取向原理	122
3.1.3 热压辐射取向环形永磁体	123
3.2 热变形磁体磁性能与微观结构	124
3.2.1 热变形磁体磁性能影响因素	124
3.2.2 热变形磁体磁化机制与矫顽力增强技术	139
3.3 热变形磁体的特性	151
3.3.1 力学性能	151
3.3.2 耐腐蚀性能与磁性能温度稳定性	154
3.3.3 电学性质	157
3.4 热压/热变形纳米双相稀土永磁材料	165
3.4.1 概述	165
3.4.2 液相扩散增强复相变形能力	167
3.4.3 液相扩散机理	172
参考文献	177
第 4 章 热挤出辐射取向环形永磁体	184
4.1 热挤出辐射取向环形磁体制备技术	184
4.1.1 背挤出磁环的组织形成机理	185
4.1.2 背挤出过程中剩磁和组织分布规律	186
4.1.3 背挤出过程中 Nd ₂ Fe ₁₄ B 片状晶的转向机制	189
4.1.4 磁环组织程度的半定量描述	191
4.2 热挤出 Nd-Fe-B 辐向磁环的开裂机制	192
4.2.1 背挤出辐向磁环轴向开裂的机理	192
4.2.2 背挤出辐向磁环环向开裂的机理	194
4.3 磁性质不均匀性及其来源	200
4.4 充磁原理和技术	213
参考文献	220
第 5 章 稀土永磁电机技术	223
5.1 稀土永磁电机	223
5.1.1 概述	223

5.1.2	历史和发展趋势	223
5.1.3	主要应用领域	226
5.1.4	永磁电机面临的问题	227
5.2	永磁材料技术	229
5.2.1	永磁材料及其特性	229
5.2.2	充退磁技术	241
5.3	永磁电机设计技术	244
5.3.1	磁场与磁路	244
5.3.2	等效磁路设计与计算	247
5.3.3	场路耦合设计技术	251
5.3.4	多场耦合设计	252
	参考文献	257
第 6 章	永磁旋转电机	259
6.1	原理和设计方法	259
6.1.1	基本结构与分类	259
6.1.2	原理	262
6.1.3	设计方法	264
6.2	磁路结构与计算	266
6.2.1	磁路结构形式	266
6.2.2	极槽配合	268
6.2.3	绕组结构	270
6.2.4	参数设计	272
6.2.5	反电动势和电磁转矩	276
6.2.6	齿槽转矩和波动力矩	284
6.2.7	运行特性	286
6.3	伺服电机	288
6.3.1	概况	288
6.3.2	结构与磁路	289
6.3.3	设计与计算	291
6.3.4	性能测试	296
6.4	力矩电机	298
6.4.1	概况	298
6.4.2	结构与磁路	300
6.4.3	设计与计算	302

6.4.4	性能测试	306
6.5	轮毂电机	308
6.5.1	概况	308
6.5.2	结构与磁路	310
6.5.3	设计与计算	312
6.5.4	性能测试	316
	参考文献	317
第7章	永磁直线电机	319
7.1	原理和设计方法	319
7.1.1	结构与分类	319
7.1.2	原理	321
7.1.3	设计方法	323
7.2	磁路结构与计算	325
7.2.1	磁路结构形式	325
7.2.2	极槽配合	327
7.2.3	绕组结构	328
7.2.4	参数设计	329
7.2.5	反电动势和电磁推力	331
7.2.6	磁阻力	332
7.2.7	运行特性	334
7.3	有铁心永磁直线电机	335
7.3.1	概况	335
7.3.2	结构与磁路	338
7.3.3	设计与计算	339
7.3.4	性能测试	345
7.4	无铁心永磁直线电机	348
7.4.1	概况	348
7.4.2	结构与磁路	349
7.4.3	设计与计算	352
7.4.4	性能测试	355
7.5	圆筒形永磁直线电机	357
7.5.1	概况	357
7.5.2	结构与磁路	357
7.5.3	设计与计算	359

7.6 音圈电机	365
7.6.1 概况	365
7.6.2 结构与磁路	366
7.6.3 设计与计算	368
7.6.4 音圈电机产品介绍	373
参考文献	375
第 8 章 辐向环永磁电机	376
8.1 概况	376
8.2 辐向环永磁直线电机	377
8.2.1 辐向环音圈电机	377
8.2.2 辐向环轴式直线电机	383
8.3 辐向环永磁旋转电机	386
8.3.1 伺服电机	386
8.3.2 辐向环力矩电机	388
参考文献	391
第 9 章 永磁直驱电机应用	392
9.1 X Y-Theta 平台	392
9.1.1 概述	392
9.1.2 结构设计	392
9.1.3 性能测试	395
9.2 气浮平台直线电机超精密工件台	397
9.2.1 概述	397
9.2.2 结构设计	400
9.2.3 性能测试	404
9.3 抛光机器人	406
9.3.1 概述	406
9.3.2 结构设计	407
9.3.3 性能测试	408
9.4 基于外转子永磁力矩电机的圆编机	409
9.4.1 概述	409
9.4.2 结构设计	410
9.4.3 性能测试	413
9.5 磁浮门机	414
9.5.1 概述	414

9.5.2 结构设计	414
9.5.3 性能测试	417
9.6 直驱数控机床	419
9.6.1 概述	419
9.6.2 数控机床直驱进给系统	420
9.6.3 直驱进给系统电机选型流程	422
9.6.4 直驱电机性能参数	423
参考文献	424

第 1 章 稀土永磁材料及其发展趋势

1.1 稀土永磁材料的发展历史

磁性材料是古老而用途十分广泛的功能材料。物质的磁性早在 3000 年以前就被人们认识和应用。我国早在战国时期就有关于天然磁性材料（如磁铁矿）的记载，并在 11 世纪发明了制造人工永磁材料的方法，是世界上最早发现物质磁性现象和应用磁性材料的国家。

人类最先大量使用的永磁材料是马氏体钢，随后逐渐被铸造 Al-Ni-Co 永磁材料代替。20 世纪 60 年代以来，以 SmCo_5 、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 、Nd-Fe-B 为代表的稀土永磁材料相继问世，它们的发明标志着人类使用的磁性材料进入了一个新的时代。目前稀土永磁材料以其卓越的磁性能，在航空航天、国防军事、仪表、通信、计算机、汽车工业、石油化工、生物工程、医疗器械和家用电器等众多领域得到广泛应用，已成为高新技术和新兴产业的基本重要物质基础之一。随着稀土永磁在风力发电和电动汽车等领域的大规模应用，稀土永磁这一朝阳产业在 21 世纪将得到更大的发展。

1.1.1 永磁材料磁性特征

磁性与力、热、电、光一样是物质的基本属性之一，物质磁性源于原子磁矩。按照原子磁矩的排列方式不同，可将物质的磁性分为顺磁性、抗磁性、铁磁性、反铁磁性、亚铁磁性和螺旋磁性等。通常意义上所说的磁性材料一般是指铁磁性、亚铁磁性或螺旋磁性材料。这些材料具有自发磁化。磁性材料按功能可分为硬磁材料、软磁材料、磁致伸缩材料和磁制冷材料等类别。其中硬磁材料又称为永磁材料，是磁性材料中应用最广泛的材料之一。

永磁材料指的是磁化后去掉外磁场，能长期保留磁性，能经受一定强度的外加磁场干扰的一种功能材料。永磁材料的主要磁性能指标有剩磁（剩余磁感应强度 B_r 或剩余磁化强度 M_r ）、磁感矫顽力 H_{cb} 、内禀矫顽力 H_{cj} 和最大磁能积 $(BH)_{\text{max}}$ 。通常所说的永磁材料的磁性能指的就是这 4 项。相关的其他性能指标还有居里温度 T_c 、饱和磁化强度 M_s 、剩磁温度系数 α 、内禀矫顽力温度系数 β 和退磁曲线方形度 Q 等。其中，居里温度和饱和磁化强度等主要由材料本身的化学成分决定，而与材料的微观结构和制备工艺关系不大，称为非结构敏感参量；而剩磁、矫顽

力和最大磁能积等除了与材料的内禀性能有关还受材料的制备工艺和微观结构的影响，因此称为结构敏感参量。

1. 初始磁化曲线与磁滞回线

磁性材料对外加磁场有明显的响应特性，也就是说材料的磁化状态随外磁场强度的变化而变化，即被磁化，这种响应特性或变化可以用磁化曲线和磁滞回线来表征。磁化曲线是表征物质磁化强度 M 或磁感应强度 B 与磁场强度 H 的依赖关系的曲线。对应于磁性材料从热退磁状态到磁化饱和阶段的曲线称为初始磁化曲线（图 1-1）。

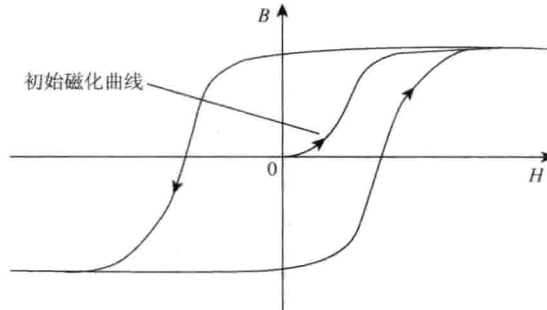


图 1-1 初始磁化曲线与磁滞回线示意图

永磁材料从磁化饱和状态开始，逐渐减小磁化场 H ，对应的 B 和 M 也随 H 的减小而减小，但是并不是沿着原曲线返回，而是表现为一定的滞后现象。随着材料由正的饱和状态到反向饱和再到正向饱和， $B-H$ 曲线或 $M-H$ 曲线形成一个闭合的回线，称为磁滞回线（图 1-1）。对应磁滞回线第二象限的一段称为退磁曲线（图 1-2）。永磁材料的主要技术指标剩磁、磁能积和矫顽力等都可以从退磁曲线上得到。

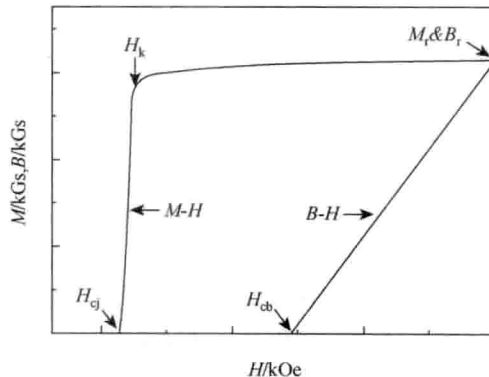


图 1-2 退磁曲线

2. 剩磁

铁磁体磁化到饱和并去掉外磁场后，在磁化方向上保留的磁化强度称为剩余磁化强度 (B_r)，保留的磁感应强度称为剩余磁感应强度 (M_r)，统一简称为剩磁。直观表现为磁滞回线或退磁曲线与 B 轴或 M 轴的交点 (图 1-2)。剩磁的单位为 T 或 Gs (或 kGs)。

3. 矫顽力

永磁材料的矫顽力有两种定义。一种是指使磁感应强度 B 变为 0 时所加的反向磁场的大小，称为磁感矫顽力 (H_{cb})。另一种是指使磁化强度 M 变为 0 时所加的反向磁场的大小，称为内禀矫顽力 (H_{cj})。它们分别对应于 B - H 曲线和 M - H 曲线与 H 轴的交点 (图 1-2)。矫顽力的单位为 A/m (或 kA/m) 或 Oe (或 kOe)。 H_{cb} 的理论极限值为 B_r 。

矫顽力特别是内禀矫顽力的大小反映了材料抗外磁场退磁的能力。内禀矫顽力 H_{cj} 是永磁材料一个非常重要的物理参量。对于 $H_{cj} \gg H_{cb}$ 的磁体，当反向磁场 $H_{cb} < H < H_{cj}$ 时，虽然此时磁体已被退磁到磁感应强度 B 反向的程度，但在反向磁场 H 撤销后，磁体的磁感应强度 B 仍能因 (部分) 微观磁偶极矩的矢量保持原方向而回到原来的方向。也就是说，只要反向磁场 H 还未达到 H_{cj} ，永磁材料便没有被完全退磁。因此，内禀矫顽力 H_{cj} 是表征永磁材料抵抗外部反向磁场或其他退磁效应，以保持其原始磁化状态能力的一个主要指标。

4. 最大磁能积

永磁体在空间产生的磁场强度除了受磁体尺寸的影响，还主要取决于磁体内部的 H 和 B 的乘积。因此， $B \cdot H$ 代表了永磁体的能量，称为磁能积。永磁体退磁曲线上各点的磁能积随 B 的变化如图 1-3 所示，其中， $(BH)_m = B_d \times H_d$ 称为最大磁能积。最大磁能积越大，在空间产生的磁场也就越大，因此要求永磁体的磁能积越大越好。磁能积的单位为 kJ/m^3 或 $\text{Gs} \cdot \text{Oe}$ (或 GOe 、 MGOe)。磁能积的理论极限值为 $\mu_0 M_s^2 / 4$ 。

5. 居里温度

根据分子场理论，当温度升高时，永磁材料内部磁矩的热扰动就会加剧，各项磁性能均会随之有所下降。当温度达到某一临界温度以上时，永磁材料可以完全失去磁性，转变为顺磁性。磁性材料由铁磁性或亚铁磁性转变为顺磁性时的临界温度称为居里温度或居里点 T_c 。居里温度是衡量永磁材料温度稳定性的重要参数，居里温度高的材料的工作温度可提高，也有利于提高磁性材料的温度稳定性。